

Е. С. Ткачёв*, И. С. Бражников, А. Н. Беляков

Белгородский государственный университет, г. Белгород

**Tkachev_e@bsu.edu.ru*,

Научный руководитель – проф., д-р физ.-мат. наук *Р. О. Кайбышев*

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 9%Cr СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА, ЛЕГИРОВАННОЙ ТАНТАЛОМ

В работе исследована микроструктура, и определен комплекс механических свойств стали 0,1C–9Cr–3Co–0,6Mo–1,8W–0,2V–0,06Nb–0,013B–0,007N–0,085Ta после отпуска при температурах 750, 780 и 800 °C в течение 3-х часов. Установлено, что с увеличением температуры отпуска твердость, предел текучести и предел прочности снижаются, при этом наблюдается значительное повышение характеристик вязкости и пластичности. На микроструктурном уровне увеличение температуры отпуска приводит к падению плотности дислокаций и увеличению ширины мартенситных реек и среднего размера частиц вторых фаз.

Ключевые слова: сталь мартенситного класса, термическая обработка, механические свойства, просвечивающая электронная микроскопия, дисперсные частицы.

E. S. Tkachev, I. S. Brazhnikov, A. N. Belyakov

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TA-ALLOYED 9%CR MARTENSITIC STEEL

The microstructure and mechanical properties of a 0.1C–9Cr–3Co–0.6Mo–1.8W–0.2V–0.06Nb–0.013B–0.007N–0.085Ta steel subjected to tempering at 750, 780 and 800°C for 3h were investigated. An increase in the tempering temperature resulted in a decrease in the hardness, the yield strength and the ultimate tensile strength, while elongation to rupture and impact toughness increased. An increase in the tempering temperature also led to an increase in the particles size and a decrease in the dislocation density.

Keywords: 9%Cr martensitic steel, heat treatment, mechanical properties, transmission electron microscopy, second-phase particles.

Высокохромистые стали мартенситного класса принадлежат к важной группе конструкционных материалов, используемых в современных угольных теплоэлектростанциях [1, 2]. Конструкционные элементы, изготавливаемые из сталей данного класса, подвергаются воздействию высоких температур во всем тепловом цикле энергоблоков. В

последние годы повышенное внимание уделяется 9%Cr сталям, в которых повышенное сопротивление ползучести обеспечивается за счет дополнительного легирования бором [3, 4]. Настоящая работа направлена на определение характеристик микроструктуры и установление комплекса механических свойств перспективной 9%Cr стали 0.1C–9Cr–1.8W–0.6Mo–3Co–Nb–V–0,0013B–0,007N–0,085Ta, содержащей тантал.

Экспериментальные образцы исследуемой стали были подвергнуты термической обработке, включающей нормализацию с температуры 1050 °С и последующий отпуск при температурах 750, 780 и 800 °С в течение 3-х часов. Такие значения температуры отпуска близки к стандартным температурам отпуска сталей данного класса и были использованы для установления температуры отпуска, при которой исследуемая сталь обладала бы оптимальным комплексом механических свойств и удовлетворительными микроструктурными характеристиками (тонкую субзеренную структуру и небольшой размер дисперсных частиц). Механические испытания на растяжение были проведены на универсальной машине INSTRON 5882, твердость стали была определена по методу Бринелля, с помощью твердомера Wolpert 3000BLD, испытания на ударную вязкость были проведены на стандартных образцах размерами 10 x 10 x 55 мм с V-образным надрезом на тестовой машине INSTRONIMP460. Микроструктурные исследования были проведены с использованием тонких фольг и экстракционных углеродных реплик на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100.

Влияние температуры отпуска на твердость и ударную вязкость исследуемой стали при комнатной температуре представлены на рис. 1. Твердость исследуемой стали монотонно снижается с увеличением температуры отпуска, в то время как значение ударной вязкости резко возрастает при увеличении температуры отпуска с 750 °С до 780 °С и остается приблизительно неизменным при дальнейшем увеличении температуры, составляя ~ 200 Дж/см².

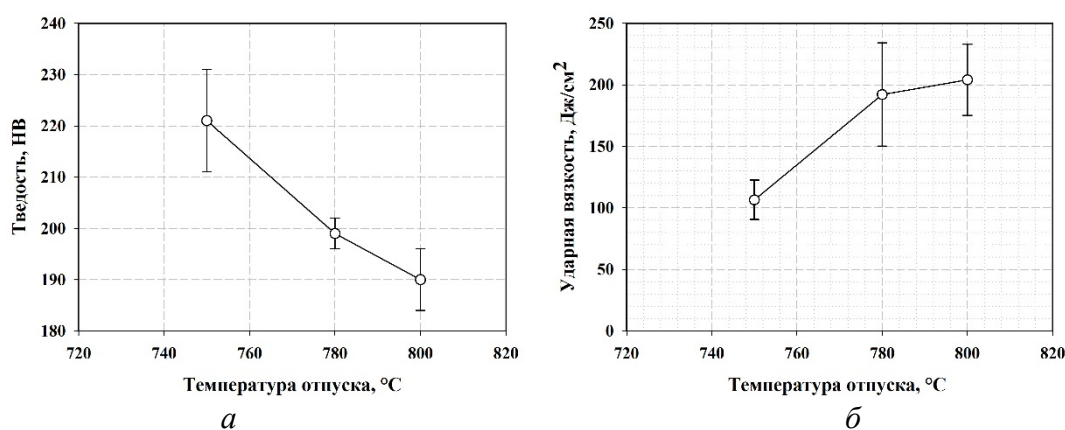


Рис. 1. Механические свойства исследуемой стали после отпуска при различных температурах: *а* – твердость; *б* – ударная вязкость

Зависимости напряжений течения от степени деформации при растяжении (рис. 2) показывают, что увеличение температуры отпуска приводит к монотонному уменьшению характеристик прочности и увеличению пластичности исследуемой стали.

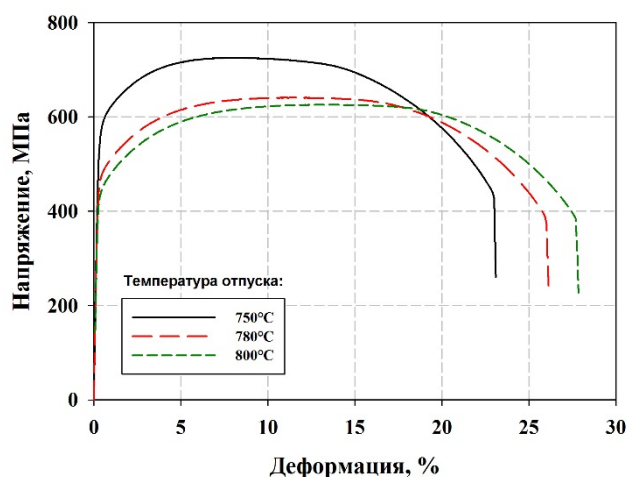


Рис. 2. Зависимость напряжения течения от степени деформации исследуемой стали после отпуска при различных температурах

Механические характеристики, определенные по результатам испытаний на статическое растяжение представлены в табл. 1. После отпуска при температуре 750 °С, предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_b) и удлинение до разрушения (δ) составили 585 МПа, 725 МПа, и 21 % соответственно. Увеличение температуры отпуска до 800 °С привело к снижению $\sigma_{0,2}$ и σ_b до 405 МПа и 630 МПа, а деформация до разрушения увеличилась до 27 %.

Таблица 1

Механические свойства исследуемой стали
после отпуска при различных температурах

| Температура отпуска | 750 °С | 780 °С | 800 °С |
|----------------------|--------|--------|--------|
| $\sigma_{0,2}$, МПа | 585 | 475 | 405 |
| σ_b , МПа | 725 | 640 | 630 |
| δ , % | 21 | 25 | 27 |

Исследование микроструктуры стали показало, что увеличение температуры отпуска приводит к увеличению среднего размера субзерен и сопровождается уменьшением плотности дислокаций (табл. 2). Характерные изображения микроструктуры исследуемой стали после отпуска при 750 °С и 800 °С представлены на рис. 3.

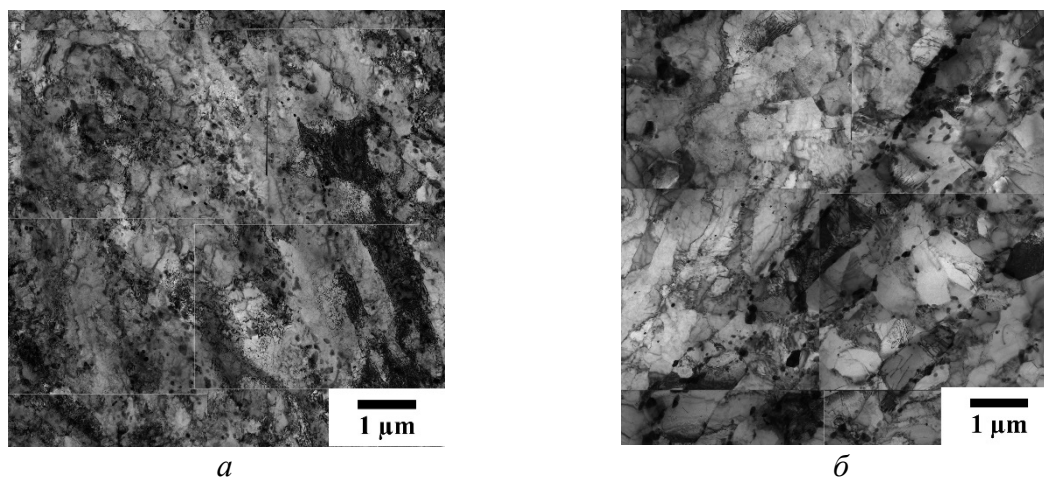


Рис. 3. Микроструктура исследуемой стали после нормализации и отпуска при различных температурах: *а* – 750 °С; *б* – 800 °С

Фазовый анализ дисперсных частиц на углеродных экстракционных репликах с помощью просвечивающего электронного микроскопа показал, что в структуре исследуемой стали после отпуска при всех выбранных температурах присутствуют частицы карбидов типа Cr_{23}C_6 и карбонитридов MX (где M – это атомы Ta , Nb и V , а X – атомы C и N). С увеличением температуры отпуска происходит увеличение среднего размера частиц вторых фаз (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики микроструктуры исследуемой стали после отпуска при различных температурах

| Температура отпуска | 750 °С | 780 °С | 800 °С |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Плотность дислокаций, 10^{14} м^{-2} | $5,2 \pm 0,4$ | $2,0 \pm 0,9$ | $1,7 \pm 0,6$ |
| Размер субзерен, мкм | $0,35 \pm 0,05$ | $0,45 \pm 0,10$ | $0,55 \pm 0,10$ |
| Размер карбидов типа Cr_{23}C_6 , нм | 70 ± 10 | 80 ± 10 | 90 ± 15 |
| Размер карбонитридов $(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{V})(\text{C}, \text{N})$, нм | 40 ± 5 | 45 ± 10 | 45 ± 10 |

Размеров карбидов типа Cr_{23}C_6 сильнее изменяется при увеличении температуры отпуска по сравнению с карбонитридами $(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{V})(\text{C}, \text{N})$. Эта особенность типична для сталей данного класса и является следствием того, что частицы карбонитридов $(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{V})(\text{C}, \text{N})$ в этих сталях обладают

большей стойкостью к коагуляции по сравнению с другими частицами [5, 6].

Полученные результаты будут использованы в дальнейшем для анализа механических свойств и микроструктурных изменений исследуемой стали в процессе высокотемпературной ползучести и длительного отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klueh R. L. Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors / R. L. Klueh, A. Nelson // *Journal of Nuclear Materials*. 2007. V. 371. №. 1. P. 37–52.
2. Кайбышев Р. О. Новые стали мартенситного класса для тепловой энергетики. Жаропрочные свойства / Р. О. Кайбышев, В. Н. Скоробогатых, И. А. Щенкова // *ФММ*. 2010. Т. 109. №. 2. С. 200–215.
3. Stabilization of martensitic microstructure in advanced 9Cr steel during creep at high temperature / F. Abe [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. V. 378. № 1. P. 299–303.
4. Theoretical Investigation of Stabilizing Mechanism by Boron in Body-Centered Cubic Iron Through (Fe, Cr) 23 (C, B) 6 Precipitates / R. Sahara [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. V. 47. № 5. P. 2487–2497.
5. Dudova N. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of boron containing 10% Cr steel / N. Dudova, R. Mishnev, R. Kaibyshev // *ISIJ international*. 2011. V. 51. № 11. P. 1912–1918.
6. Tempering behavior of a low nitrogen boron-added 9% Cr steel / I. Fedorova [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. V. 662. P. 443–455.